



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Darcy flow forsøg til bestemmelse af permeabiliteten af intaktjordprøver

Ahm, Malte

Publication date:
2013

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Ahm, M. (2013). *Darcy flow forsøg til bestemmelse af permeabiliteten af intaktjordprøver*. Department of Civil Engineering, Aalborg University. DCE Technical reports Nr. 154

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- ? Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- ? You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- ? You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Darcy flow forsøg til bestemmelse af permeabiliteten af intaktjordprøver

Malte Ahm



AALBORG UNIVERSITET

Institut for Byggeri og Anlæg

Aalborg Universitet
Institut for Byggeri og Anlæg
Sektionen for Vand og Jord

DCE Technical Report No. 154

Darcy flow forsøg til bestemmelse af permeabiliteten af intaktjordprøver

Malte Ahm

Januar 2013

© Aalborg Universitet

Videnskabelige publikationer ved Institut for Byggeri og Anlæg

Technical Reports anvendes til endelig afrapportering af forskningsresultater og videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg på Aalborg Universitet. Serien giver mulighed for at fremlægge teori, forsøgsbeskrivelser og resultater i fuldstændig og uforkortet form, hvilket ofte ikke tillades i videnskabelige tidsskrifter.

Technical Memoranda udarbejdes til præliminær udgivelse af videnskabeligt arbejde udført af ansatte ved Institut for Byggeri og Anlæg, hvor det skønnes passende. Dokumenter af denne type kan være ufuldstændige, midlertidige versioner eller dele af et større arbejde. Dette skal holdes in mente, når publikationer i serien refereres.

Contract Reports benyttes til afrapportering af rekvireret videnskabeligt arbejde. Denne type publikationer rummer fortroligt materiale, som kun vil være tilgængeligt for rekvirenten og Institut for Byggeri og Anlæg. Derfor vil Contract Reports sædvanligvis ikke blive udgivet offentligt.

Lecture Notes indeholder undervisningsmateriale udarbejdet af undervisere ansat ved Institut for Byggeri og Anlæg. Dette kan være kursusnoter, lærebøger, opgavekompendier, forsøgsmanualer eller vejledninger til computerprogrammer udviklet ved Institut for Byggeri og Anlæg.

Theses er monografier eller artikelsamlinger publiceret til afrapportering af videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg som led i opnåelsen af en ph.d.- eller doktorgrad. Afhandlingerne er offentligt tilgængelige efter succesfuldt forsvar af den akademiske grad.

Latest News rummer nyheder om det videnskabelige arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg med henblik på at skabe dialog, information og kontakt om igangværende forskning. Dette inkluderer status af forskningsprojekter, udvikling i laboratorier, information om samarbejde og nyeste forskningsresultater.

Udgivet 2013 af
Aalborg Universitet
Institut for Byggeri og Anlæg
Sohngårdsholmsvej 57,
DK-9000 Aalborg, Danmark

Trykt i Aalborg på Aalborg Universitet

ISSN 1901-726X
DCE Technical Report No. 154

Darcy flow forsøg til bestemmelse af permeabiliteten af intaktjordprøver

Denne vejledning omhandler bestemmelse af permeabiliteten af intaktjordprøver ved brug af Darcys lov. Forsøget bliver også omtalt som "Constant-head conductivity test" i den engelske faglitteratur.

Vejledningen er en del af en serie, der beskriver udførelsen af geotekniske klassifikationsforsøg og øvrige forsøg som de foretages i laboratoriet for fundering ved Aalborg Universitet.

Vejledningen er opbygget på følgende måde:

Definitioner.....	6
Apparatur.....	7
Kalibrering af udstyr.....	8
Klargøring af prøvemateriale.....	8
Forsøgsprocedure	8
Forberedelse af forsøgsopstilling (mindst 24 timer før forsøg startes).....	8
Forberedelse af forsøg	9
Montering af intaktprøve	10
Vandmætning af intaktprøve	10
Udførelse af forsøg	12
Beregninger	12
Rapportering.....	13
Bemærkninger	13
Skema 1 til Darcy flow forsøg.....	15
Skema 2 til Darcy flow forsøg.....	17

Det anbefales brugeren af denne vejledning at læse hele vejledningen igennem inden forsøget påbegyndes.

Enheder er angivet med [], f.eks. [m^2].

Definitioner

Formålet med forsøget er at bestemme permeabiliteten af en given intaktjordsprøve, hvorved mediets hydrauliske ledningsevne kan bestemmes ved forskellige vandtemperaturer. Det anbefales at der som minimum foretages en dobbelbestemmelse af hver intaktjordsprøve, hvis det er muligt tidsmæssigt, da forsøg på meget lerede prøver kan tage flere dage med det tilgængelige vandtryk i laboratoriet. Endvidere kan det anbefales at bestemme den hydrauliske ledningsevne ved forskellige trykhøjder. Det skal dog pointeres, at den anvendte trykhøjde bør tilpasses jordtypen således, at f.eks. fine korn ikke skylles ud. Start derfor forsøget ved lav trykhøjde.

Forsøget bygger på Darcys lov, som derfor kort vil blive gennemgået. En uddybende beskrivelse af hydraulisk ledningsevne (hydraulic conductivity) samt denne forsøgsmetode, Constant-Head Method, kan f.eks. findes på følgende hjemmeside: <http://web.ead.anl.gov/resrad/datacoll/conuct.htm>

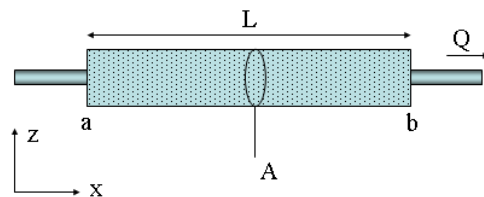
$$\text{Darcys lov: } Q = \frac{-k A}{\mu} \frac{(P_b - P_a)}{L} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

k : Permeabilitet [m^2]

μ : Viskositet [$Pa \cdot s$]

P : Tryk [Pa]

A : Tværsnitsareal [m^2]



I dette forsøg benyttes Darcys lov i følgende omskrevne form, da der antages konstant trykforskel. Endvidere antages det, at det relative tryktab i slager, fittings og lignende kan negligeres i forhold til tryktabet over prøven pga. det lave strømningshastighed.

$$\text{Darcy flux: } q = K \frac{dh}{dl} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\text{Darcy flow: } Q = K \frac{dh}{dl} A \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

K : Hydraulisk ledningsevne [$\frac{m}{s}$]

$\frac{dh}{dl}$: Trykforskel pr. prøve længde [$\frac{m}{m}$]

Med ord siger Darcys lov følgende: Flowet gennem et porøst medie for en given væske er lig med den hydrauliske ledningsevne gange trykændringen gange tværsnitsarealet.

Den hydrauliske ledningsevne er både jord- og væskespecifik. Derfor kan den hydrauliske ledningsevne med fordel omregnes til permeabilitetskoefficient for jorden, som kun er jordspecifik:

$$\text{Permeabilitetskoefficient: } k = K \frac{\mu}{\rho g} [m^2]$$

μ : Dynamisk viskositet af væsken [$\frac{kg}{m \cdot s}$]

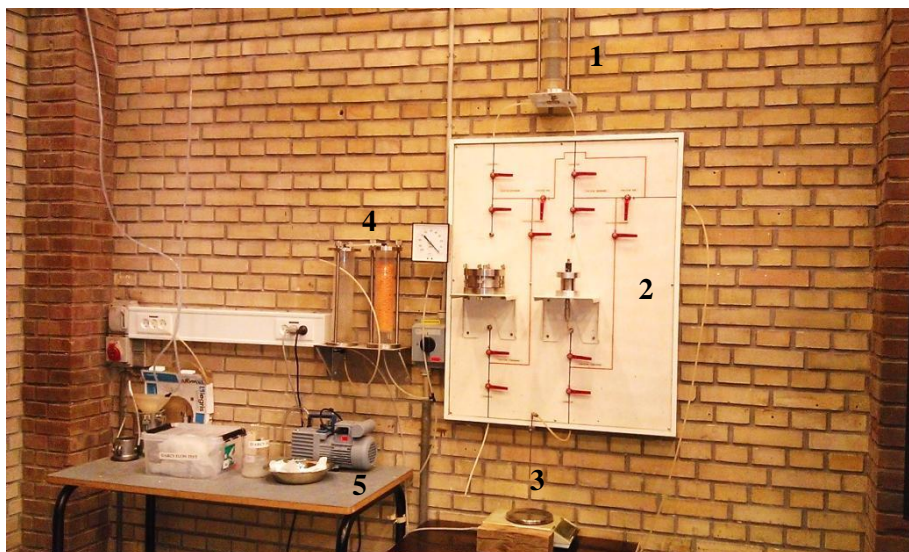
ρ : Densitet af væsken [$\frac{kg}{m^3}$]

g : Tyngdeacceleration [$\frac{m}{s^2}$]

Sammenligningen af jordprøver bliver entydig ved anvendelse permeabilitetskoefficienten.

Apparatur

Forsøgsopstillingen (Figur 1) er opsat på bagvæggen i Hal 2 (L-107) i L-bygningen.



Figur 1: Forsøgsopstilling.

Forsøgsopstilling består af følgende hovedelementer:

- Vandresevoir ved væg (ikke vist på figuren)
- Luftfælde – nr. 1
- Forsøgsapparatur (ventiltavle) – nr. 2
- Elektronisk vægt – nr. 3
- Vandfælde - nr. 4
- Vakuumpumpe – nr. 5

Der til kommer lidt forskelligt udstyr, som er vist på Figur 2.



Figur 2: Udstyr til forsøgsopstillingen.

- Tragt
- Kasse med forskellige smådele og værktøj til af prøveholder, herunder:
 - Pakningstape
 - Termometer
- Måleglas til opsamling af det gennemstrømmede vand.
- Prøveholder

Kalibrering af udstyr

Apparaturen der anvendes til dette forsøg kræver ingen kalibrering som udgangspunkt. Det skal dog sikres at alt apparaturet er tæt, da utætheder vil påvirke forsøgets udfald betydeligt. Endvidere skal det sikres at vægten, som anvendes til at veje den gennemstrømmede væske er indstillet korrekt i vater og at ”overlægningspladen” på vægten er placeret korrekt. Det anbefales at vægten kontrolleres og nulstilles inden hvert forsøg påbegyndes.

Klargøring af prøvemateriale

Intaktprøverne udtages i cylindere med målene $\varnothing 50 \times 50$ mm, se Figur 3. Efter udtagning opbevares intaktprøverne køligt indtil forsøget påbegyndes. Hvis forsøget ønskes udført ved rumtemperatur bør den enkelte prøve udtages en time før forsøget påbegyndes for at temperere prøven.



Figur 3: Intaktprøvecylinder.

Forsøgsprocedure

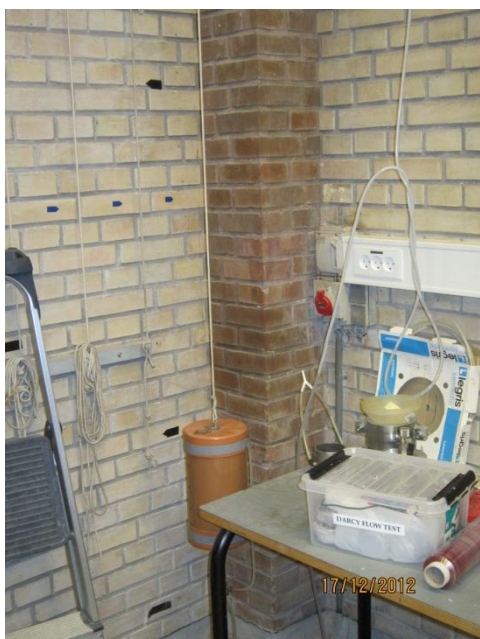
Forsøgsproceduren er opdelt i fem dele; forberedelse af forsøgsopstilling, forberedelse af forsøg, montering af intaktprøve, vandmætning af intaktprøve og udførelse af forsøg. Det er vigtigt, at den forberedende del foretages mindst 24 timer inden forsøget startes for at sikre konstant temperatur under forsøget.

Forberedelse af forsøgsopstilling (mindst 24 timer før forsøg startes)

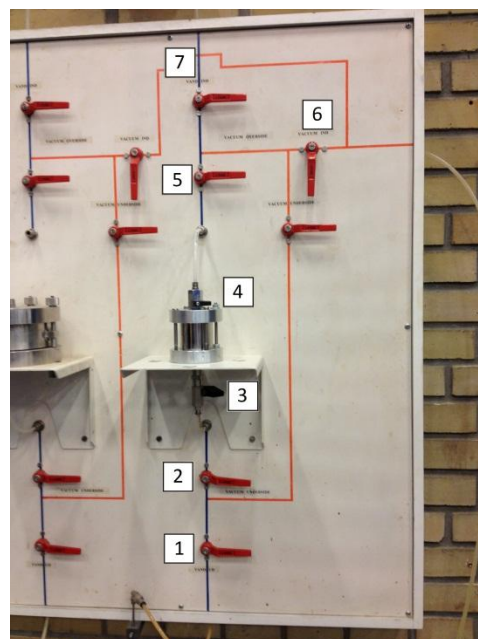
Følgende kontrolleres mindst 24 timer inden forsøget startes:

1. Det kontrolleres om vandfælden før vakuumpumpen er tømt for vand, hvis ikke tømmes fælden.
2. Det kontrolleres, at silica gelen før vakuumpumpen ikke er for fugtig, ellers kan det ikke opsuge eventuel vand fra vandfælden.
3. Det kontrolleres at vakuumpumpe kan opbygge et tryk ~ -90 til -100 kPa ved lukkede ventiler.
4. Vandreservoiret ved væggen fyldes med vand mindst 24 timer før forsøg, for at sikre at vandet har rumtemperatur. Beholderen fyldes helt op. Hvis prøvematerialet er ler eller silt er det en fordel at hæve beholderen op til 4 eller 5 meter for at temperaturen er konstant under forsøget.
5. Den sort spand under bord fyldes op med vand ca. 24 timer før forsøg. Dette gøres for have vand med rumtemperatur til at toppe vandreservoiret op efter hvert forsøg.

6. Det kontrolleres om løkkerne på snoren stemmer overens med meteropmærkningen på væggen (meteropmærkning er markeret med sort tape). Snoren er en smule elastisk, så det er vigtigt, at vandreservoiret er fyldt. Hvis meteropmærkningen ikke passer ændres dette ved at ændre løkkernes placering på snoren, se Figur 4.



Figur 4: Meteropmærkning på væg (sort tape).



Figur 5: Nummerering af haner på ventiltavle.

7. Det kontrolleres, at stålrøret under ventiltavlen er udfor markeringen på væggen.
8. Det kontrolleres, at luftfælden (vandreservoiret) over ventiltavle er fyldt med vand og ikke indeholder nogle luftbobler, hvis ikke udluftes beholderen.
9. Det kontrolleres om filterne i prøveholderen er rene, hvis ikke kan de enten rengøres under rindende vand og tørres med trykluft, rengøres i ultralydsmaskine og tørres med trykluft eller der kan laves nye.
10. Alle haner på ventiltavlen skal være lukket, se Figur 5 hvor nummereringen af hanerne også fremgår. Denne nummerering bruges i det følgende.

Forberedelse af forsøg

Følgende kontrolleres inden hvert forsøg:

1. Det kontrolleres om vandfælden før vakuumpumpen er tømt for vand, hvis ikke tømmer fælden.
2. Vandreservoiret ved væggen fyldes helt op med det rumtempererede vand fra den sorte spand.
3. Det kontrolleres, at luftfælden over ventiltavlen er fyldt med vand og ikke indeholder luftbobler, hvis ikke udluftes beholderen.
4. Det kontrolleres om filterne i prøveholderen er rene, hvis ikke rengøres de.
5. Alle haner på ventiltavlen skal være lukket, se Figur 5, hvor nummereringen af hanerne også fremgår. Denne nummerering bruges i det følgende.

Montering af intaktprøve

Montering af intaktprøve i prøveholder og efterfølgende i apparaturet (ventiltavlen).

1. Prop tages af den flade ende af cylinderen og bundstykket af prøveholderen monteres på prøven mens bundstykket vender på hoved.
2. Prøven vendes om så den står med bundstykket nedad.
3. Den anden prop (cylinders skarpe ende) tages af cylinder og topstykket af prøveholderen trykkes ned over prøven.
4. De fire gevindstænger skrues i - diagonalt. Prøven skal være spændt lige, dette kan eventuelt kontrolleres med lineal eller skydelære, se Figur 6.
5. Den kommes pakningstape omkring gevindet til slagen, som monteres på undersiden af prøveholderen. Slangen placeres i ventiltavle, se Figur 7. Husk spændeskiven, så prøveholderen spændes fast til ventiltavlen idet gevindet skrues i.
6. Slange fra topstykket placeres i ventiltavle, se Figur 7.
7. Det kontrolleres om ventilerne på over- og underside af prøveholderen er lukkede, nr. 3 og 4.



Figur 6: Gevindstænger skrues fast.



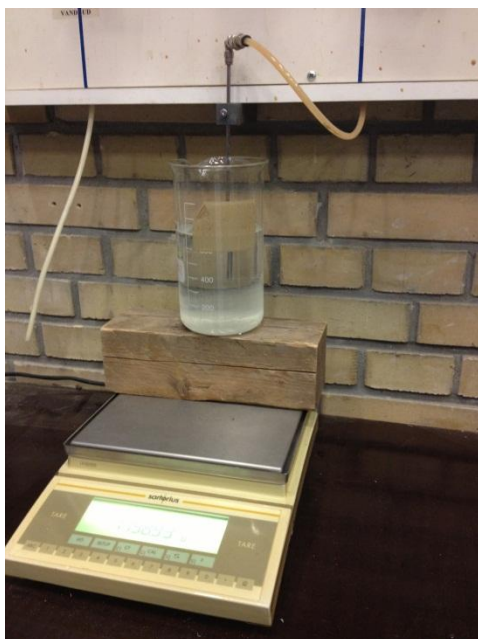
Figur 7: Prøve fastgøres i apparat (ventiltavle).

Vandmætning af intaktprøve

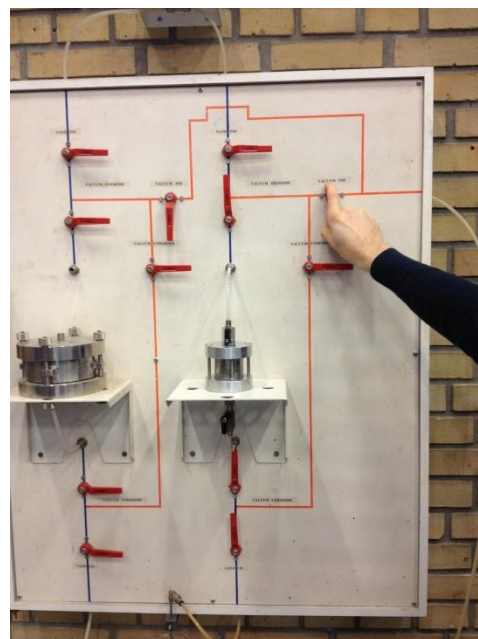
Vandmætning af prøven ved at suge vand op igennem prøven ved hjælp af undertryk.

1. Måleglasset fyldes med vand fra den sorte spand og placeres på vægt, som vist på Figur 8.
2. Vandtemperaturen fra beholder ved væggen måles og noteres i skema 1. Beholderen hæves til den ønskede trykhøjde for forsøget (1-2 meter for sand, 2-4 meter for silt, 4-5 for ler).
3. Vakuumpumpen tændes, og der opbygges et tryk ~ -90 til -100 kPa.

4. Prøven vandmættes ved at suge vand op igennem prøven. Dette gøres ved at åbne hane 1 + 2 + 3 + 4 + 5, hane 6 åbnes også, men meget langsomt, så undertrykket påføres prøven langsomt og derved ikke ødelægger prøven (åbningshastighed ca. 30 sec.).
5. Når der ikke fremkommer flere luftbobler i slangen fra topstykket af prøveholderen eller i vandfælden, ventes yderligere 1-2 minutter for sand og ca. 5-8 minutter for ler og silt (alt efter vandmætningshastigheden). Det er nødvendigt at føle sig lidt frem i forhold til vandmætning - brug ganske almindelig sund fornuft. Se Figur 9.



Figur 8: Stålrør nede i måleglas med vand.



Figur 9: Prøve vandmættes.

6. Når vandmætningen er overstået lukkes for hane 6 + 5 + 4 + 3 + 2 + 1 (i denne rækkefølge).
7. Hane 7 åbnes, hvorefter hane 6 åbnes på klem kortvarigt for at sikre, at der ikke er fanget noget luft mellem hane 5, 6 og 7.
8. Sluk vakuumpumpen.
9. Måleglassets resterende indhold tømmes tilbage i den sorte spand og tørres.
10. Måleglas placeres på vægt og der kontrolleres om stålrøret er ud for mærket på væggen.
11. Der åbnes for hane 5 + 4 + 3 + 2 + 1 (i denne rækkefølge).
12. Hvis det ikke er muligt at presse vand gennem prøven ved den valgte trykhøjde øges trykhøjden (der kommer ikke vand ud af stålrøret).
13. Når vandføring virker jævn lukkes hane 1.
14. Måleglassets indhold kasseres, glasset vaskes og tørres, og placeres igen på vægt. Hvis det forventes at forsøget vil tage længere tid (+30 min) bør der sættes film over måleglasset for at vandet ikke fordamper.
15. Vægten nulstilles og stopur findes frem.

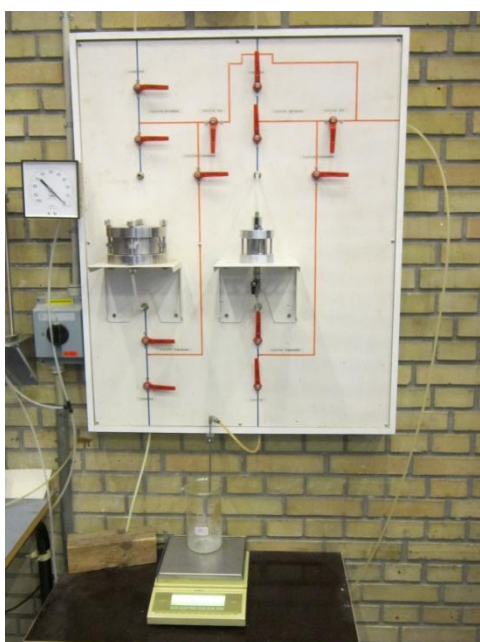
Udførelse af forsøg

1. Hane 1 åbnes samtidig med at stopur startes, se Figur 10.
2. Forsøget afsluttes når der er kommet ca. 300 g vand igennem prøven eller efter 1 – 2 timer for sand. For ler og silt er det nok med 50 - 100 g vand gennem prøven – dette kan tage mere end 24 timer.
3. Forsøget stoppes ved at lukke hane 1 samtidig med at stopuret stoppes. Luk derefter de resterende haner som er åbne.
4. Trykhøjde, gennemløbstid, vandmængden samt vandtemperatur fra måleglas noteres i skema 1.
5. Måleglassets indhold kasseres, da det ikke må genbruges til nye forsøg. Måleglasset vaskes og tørres.

Prøve tages ud af apparatet. Hold papir under når prøve/slanger tages ud da der ellers vil komme vand ned i vægten, se Figur 11. Prøven tages ud af cylinderen og cylinderen rengøres.

Prøven kan evt. anvendes til bestemmes af porøsitet/poretal, se afsnittet ”Bemærkninger” side 13.

6. Filter rengøres og vandfælden tømmes.



Figur 10: Ventiltavle under forsøg.



Figur 11: Prøve tages ud af apparat.

Beregninger

Under forsøget noteres følgende værdier på **Skema 1 til Darcy flow forsøg**:

- Trykforskel (Δh) [m] – Afstand mellem middelvandspejl i vandreservoir (spand) og udløbsrør.
- Vandtemperatur før forsøg [$^{\circ}\text{C}$] – Vandtemperatur i vandreservoir før forsøg.
- Tid [sek.] – Tiden hvor vandet gennemstrømmer jordprøven.
- Gennemstrømmet vand [g] – Den gennemstrømmede vandmængde i opsamlingsmåleglasset efter endt forsøgt målt i gram.
- Vandtemperatur efter forsøg [$^{\circ}\text{C}$] – Vandtemperatur i opsamlingsmåleglas efter forsøg.

På baggrund af overstående værdier kan den hydrauliske ledningsevne og permeabilitetskoefficienten for jordprøven beregnes. Vandets massefylde og dynamiske viskositet ved middelvandtemperaturen skal dog bestemmes inden. Disse kan f.eks. findes i Appendiks B i Lærebog i Hydraulik af Michael Brorsen og Torben Larsen eller på følgende hjemmeside: http://www.thermexcel.com/english/tables/eau_atm.htm

Beregning af den hydrauliske ledningsevne sker ved følgende omskrivning af Darcy's lov:

$$K = \frac{Q L}{A \Delta h} \left[\frac{m}{s} \right]$$

Equation 1

Q : Vandføringen beregnes på baggrund af det gennemstrømmende vandvolumen og tiden.

Husk at omregn vandføringen til enheden $\left[\frac{m^3}{s} \right]$

L : Længden, L , er højden af prøvecylinderen $[m]$.

A : Tværsnitsarealet er det indre tværsnitsareal af prøvecylinderen $[m^2]$.

Beregning af permeabilitetskoefficienten sker ved følgende formel:

$$k = K \frac{\mu}{\rho g} [m^2]$$

Equation 2

μ : Dynamisk viskositet af væsken $\left[\frac{kg}{m s} \right]$

ρ : Densitet af væsken $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

g : Tyngdeacceleration $\left[\frac{m}{s^2} \right]$

Rapportering

Det gennemstrømmede vands vægt aflæses med to decimaler for at kunne beregne den hydrauliske ledningsevne og permeabilitetskoefficienten med to decimaler.

Bemærkninger

Det er vigtigt, at der ikke røres ved afsatsen som vægten er placeret på eller selve vægten under forsøget, da vægten er meget følsom. Hurtige bevægelser i nærheden af vægten kan sågar påvirke den i mindre grad.

Det er vigtigt at jordprøverne er afrettet jævnt i begge ender af prøvecylinderen. I tilfælde af at der mangler jord i enderne af cylinderen er det ikke muligt at efterfylde den. Efterfyldning af cylinderen vil give misvisende resultater af forsøget.

Efter endt forsøg kan de enkelte jordprøver anvendes til at bestemmes den totale porøsitet ved tørring af prøverne ved 105°C. Det er vigtigt at de enkelte prøver ikke mister vand, når de udtages fra prøveholderen. Luk derfor for ventilerne på prøveholderen inden afmontering efter endt forsøg. Endvidere er det også vigtigt at vandet i slangerne til prøveholderen ikke medtages ved bestemmelsen af den totale porøsitet.

Skema 1 til Darcy flow forsøg

Sag			Sag nr.
Undersøgt d.	til	Lab. nr.	Boring nr.
Kontr. d.	Godk. d.	Kote	Bilag nr.

Darcy flow forsøg

Gruppe nr.:						
Prøve nr.	Forsøgs nr.	Trykforskel (Δh) [m]	Vandtemperatur før forsøg [°C]	Tid [sek.]	Gennemstrømmet vand [g]	Vandtemperatur efter forsøg [°C]
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					

Skema 2 til Darcy flow forsøg

Sag			Sag nr.
Undersøgt d.	til	Lab. nr.	Boring nr.
Kontr. d.	Godk. d.	Kote	Bilag nr.

Beregning af intaktjordprøvens permeabilitetskoefficient.

Gruppe nr.:						
Prøve nr.	Forsøgs nr.	Massefylde af vand ved middel temperatur [g/L]	Gennemstrømmet vandvolumen [L]	Dynamisk viskositet af vand ved middel temperatur [N s/m ²]	Eq. 1 [m/s]	Eq. 2 [m ²]
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					
	1					
	2					
	3					

